

06;12

Эффективные конвертеры рентгеновского излучения

© В.И. Беспалов, В.В. Рыжов, И.Ю. Турчановский

Томский политехнический университет
Институт сильноточной электроники СО РАН, Томск

Поступило в Редакцию 23 июня 1997 г.

Методом Монте-Карло проведены исследования эффективности конверсии энергии низкоэнергетических электронов в энергию рентгеновского излучения и показан важный вклад характеристического излучения в энергию, поглощенную в тонких пленках, при их радиационной обработке. Основанный на расчетах выбор материала и толщины конвертера позволяет в 2–5 раз увеличить энергию излучения, поглощаемую в тонких пленках полупроводниковых материалов.

Закономерности генерации тормозного излучения, возникающего при торможении высокоэнергетических электронов в мишени, хорошо изучены экспериментально и теоретически [1,2]. Обычно при этих энергиях для максимального выхода тормозного излучения используют материалы с высоким атомным номером Z (вольфрам и тантал). Однако при торможении низкоэнергетических электронов заметная часть энергии может излучаться в виде характеристического излучения, которое возникает как в результате фотопоглощения вторичных фотонов, так и в результате ионизации внутренних оболочек атома электронным ударом. Так как сечение второго процесса возрастает с уменьшением атомного номера Z , то возможна высокая эффективность генерации рентгеновского излучения и в материалах с низким Z .

Это обстоятельство необходимо учитывать при радиационной обработке тонких пленок и фольг, эффективность которой определяется не только полной энергией излучения, но и его спектральным составом. С целью исследования оптимальных условий облучения и выбора эффективных конвертеров рентгеновского излучения для обработки тонких пленок нами использовалась программа, моделирующая процесс развития электронно-фотонного каскада в конвертере и поглощение излучения в материале пленки методом Монте-Карло. Для расчетов спектрального распределения излучения за конвертером был разработан

Энергия фотонов, выходящих за конвертер оптимальной толщины (keV), и доля характеристического излучения в ней (%). (Результаты расчетов нормированы на один упавший электрон).

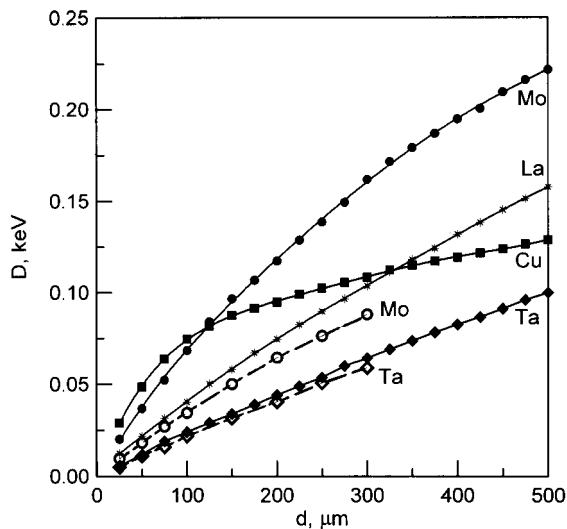
E_0 , keV	Cu	Mo	La	Ta
50	0.098	0.0608	0.0516	0.060
	69	40	16	0
100	0.235	0.224	0.221	2.43
	54	34	16	5
500	2.26	3.10	4.08	5.08
	5	8	9	8

вариант программы [3], в котором учитываются процессы генерации характеристического излучения в результате ионизации K -оболочки как квантами тормозного излучения, так и электронами. Сечение K -ионизации электронным ударом было взято из работы [4].

Для исследования оптимальных условий радиационной обработки тонких пленок были проведены расчеты поглощенной энергии в пленках полупроводниковых материалов для конвертеров с различными атомными номерами $Z = 29, 42, 57, 73$. Начальная энергия электронов изменялась от 50 до 500 keV. Толщина конвертеров оптимизировалась по полному выходу энергии излучения, а для поглощения электронов, выходящих из конвертера, за ним располагалась пластина из графита соответствующей толщины.

Важная роль характеристического излучения за конвертерами с различными атомными номерами Z следует из данных, приведенных в таблице. Из таблицы следует, что вплоть до начальных энергий электронов $E_0 = 100$ keV полный выход энергии рентгеновского излучения за конвертерами из меди выше, чем за конвертерами из тантала. При этом вклад характеристического излучения для меди превышает 50%, в то время как для тантала он на порядок меньше.

Результаты расчетов для пленок из кремния, облучаемых рентгеновским излучением электронов с начальной энергией 500 keV, приведены на рисунке. Расчеты показали, что выбор материала конвертера зависит как от толщины обрабатываемой фольги, так и от начальной энергии электронов. Так, для $E_0 = 500$ keV при обработке тонких пленок крем-



Зависимость энергии рентгеновского излучения, поглощенного в слое кремния, от его толщины и вещества конвертера для начальной энергии электронов $E_0 = 500 \text{ keV}$. Сплошные кривые — расчет для незащищенных пленок, пунктирные — для пленок, покрытых слоем SiO_2 толщиной 500 μm . (Результаты расчетов нормированы на один упавший электрон).

ния ($d < 100 \mu\text{m}$) следует использовать конвертеры из меди, в то время как для толстых пленок ($100 < d < 500 \mu\text{m}$) наиболее эффективными являются конвертеры из молибдена. При этом, как следует из рисунка, энергия, поглощенная в пленке из кремния, примерно в два раза выше, чем ее значение при использовании традиционных конвертеров из тантала. Из расчетов следует, что для меньших начальных энергий электронов наиболее эффективными являются конвертеры из меди, для которых выигрыш по поглощенной энергии по сравнению с конвертерами из тантала при $E_0 = 100 \text{ keV}$ достигает 5–6 раз.

Покрытия, которые часто используются для защиты полупроводниковых пленок, например активных элементов солнечных батарей, играют существенную роль в перераспределении поглощенной энергии. На рисунке пунктирными кривыми приведены результаты расчетов энергии, поглощенной в кремниевой пленке, покрытой слоем SiO_2 толщиной

500 μm . Из рисунка следует, что при проведении экспериментов по воздействию рентгеновского излучения на элементы солнечных батарей в качестве конвертеров следует использовать фольги из молибдена. Эти конвертеры в 1.3–2 раза эффективнее, чем традиционные конвертеры из тантала.

Расчеты показали, что при обработке германия конвертеры из молибдена следует применять лишь для очень тонких пленок ($d < 20 \mu\text{m}$), а для пленок средней толщины ($20 < d < 200 \mu\text{m}$) наиболее эффективными являются конвертеры из лантана.

Список литературы

- [1] Halbleib J.A., Lockwood G.J., Miller G.H. // IEEE Trans. Nucl. Science. 1976. V. NS-23. N 6. P. 1881–1885.
- [2] Ryzhov V.V., Sapozhnikov A.A. // Proc. 9th Intern. Conf. on High-Power Particle Beams "Beams-92". Washington, USA. May 25–29, 1992. V. 2. P. 1199–1204.
- [3] Беспалов В.И., Коровин С.Д., Рыжов В.В., Турчановский И.Ю. // Proc. 10th IEEE Intern. Pulsed Power Conf. Albuquerque, New Mexico, USA, 10–13 July, 1995. V. 1. P. 75–79.
- [4] Kolbenstvedt H. // J. Appl. Phys. 1967. V. 38. N 12. P. 4785–4787.